

# 공기흐름을 고려한 반원형 강철 구조에 대한 고에너지 레이저 조사 효과 분석

주재현<sup>\*,1)</sup> · 최준홍<sup>1)</sup> · 윤정한<sup>1)</sup> · 신완순<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구원

## Analysis of High-energy Laser Irradiation Effect on a Half-cylindrical Steel Structure under Airflow

Jaehyun Joo<sup>\*,1)</sup> · Joonhong Choi<sup>1)</sup> · Junghan Yun<sup>1)</sup> · Wansoon Shin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 4<sup>th</sup> R&D Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 12 December 2024 / Revised 6 February 2025 / Accepted 12 February 2025)

### Abstract

In this paper, the damage of a semicircular steel structure specimen simulating a threat when irradiated with a high-energy laser under airflow conditions was analyzed by experiments and numerical analysis. The laser used in this experiment was a CW fiber laser with a wavelength of 1.07  $\mu\text{m}$  and irradiated the specimen within a maximum power of 10 kW. For quantitative analysis of the laser effect, a high-speed camera and a thermal imaging camera were used to acquire the melt-through time and temperature evolution of the specimen, respectively. Along with the experiment, numerical analysis of the experimental conditions was also performed using COMSOL Multiphysics, a commercial code. In addition to the semicircular steel structure, an air domain was added to simulate airflow, and a top-hat shape distribution was applied for beam energy distribution. Two different beam absorption rates were applied to the steel material to compare the temperature distribution of the experimental results, respectively.

Key Words : High-Energy Laser(고에너지 레이저), Laser-Material Interaction(레이저-재료 상호작용), Melt-Through Time(용융-관통 시간), Numerical Simulation(수치해석)

## 1. 서론

레이저의 고출력화가 가능해짐에 따라 그동안 산업

계에서 주로 활용되던 레이저 기술이 이제는 군사적 이용을 위해 활발히 연구되고 있으며<sup>[1-3]</sup>, 제한적이지 만 전력화된 사례도 보고되고 있다<sup>[4]</sup>. 레이저 기술의 군사적 활용도는 레이저의 출력이 증가함에 따라 감시, 정찰 및 원격유도 등의 제한된 분야에서 무인기 및 드론 등을 대상으로 하는 국지방호 기술, 로켓/야

\* Corresponding author, E-mail: jhjoo@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

포/박격포 등을 근거리에서 공중 요격하는 무기체계 기술과 같이 다양한 분야로 확장되고 있으며, 동시에 언급된 위협체들에 대한 레이저의 효과를 분석하는 연구들도 다양하게 수행되고 있다<sup>1,5,6</sup>. Schäffer 등<sup>1</sup>은 풍동시험시설을 이용하여 아음속 및 초음속 흐름에서 고출력 레이저 실험을 수행하고 레이저 조사와 공기 흐름 및 재료 간의 상호 작용 관련 실험을 수행하였다. 특히 아음속과 초음속 흐름에서 대표적인 미사일 재료들(철, 알루미늄, CFRP 등)에 대한 레이저 조사 실험 결과를 통해 정적 환경, 아음속 및 초음속 흐름에서의 각 소재들의 관통 시간을 비교하였으며 고속 이미징 기술을 통해 레이저 조사 시의 각 소재의 손상 형태를 관찰하였다. Schlijpen 등<sup>2</sup>은 30 kW 출력의 레이저 시설을 이용하여 TNO(네덜란드의 응용과학 연구기관)에서 수행한 드론과 드론 구성품들에 대한 고에너지 레이저 효과에 대한 일련의 실험결과를 통해 드론 구성품에 따라 치명적 손상에 필요한 고에너지 레이저 조사시간에 큰 차이가 있을 수 있음을 보고한다. Taillandier 등<sup>3</sup>은 유럽의 TALOS(Tactical Advanced Laser Optical System) 프로그램에서 수행된 연구로서 1.07  $\mu\text{m}$  연속 파장의 수 kW 급 고에너지 레이저를 다양한 표적 소재들, 무인기 구성품 및 소형 드론에 조사하여 얻은 결과에 대해 보고한다. Back 등<sup>5</sup>은 두 종류의 금속 소재에 대하여 아음속 공기흐름 조건과 공기흐름이 없는 조건에서의 빔 에너지 밀도에 따른 용융 관통 시간을 비교하여 공기흐름의 대류 냉각 효과와 공기흐름의 용융물 제거 효과가 역전되는 문턱 빔 에너지 밀도 값을 식별하였다. Wei 등<sup>6</sup>은 고에너지 레이저 조사 시 공기흐름에 의한 용융물 제거 메커니즘에 대한 이해를 위해 가시화 기술을 적용한 실험을 통해 전단응력에 의해 용융풀(pool)로부터 용융된 금속이 제거됨을 보고하였다. Yang 등<sup>7</sup>은 최대 2.8 kW 출력의 연속 레이저 빔에 의해 조사된 강철 실린더의 손상 효과에 대해 레이저 조사 직경과 소재의 두께별로 관통시간을 조사하였는데, 특히 이 논문에서는 상용코드인 COMSOL 다물리 코드를 이용한 해석 결과로서 정적조건하에서의 열전달에 의한 온도 변화를 실험결과와 비교하였다. Björck 등<sup>8</sup>은 실험실 기반의 2 kW 단일모드 광섬유 레이저를 이용하여 다양한 섬유강화 플라스틱에 대한 실험을 수행하였으며 관통시간을 분석적인 모델과 비교하였다. 또한 무인기에 대한 레이저 손상 연구도 일부 발표하였다. 이들 선행연구들은 금속, 복합재, 플라스틱, 세라믹 등 다양

한 소재들에 대한 아음속 및 심지어 초음속 공기흐름 조건에서의 고에너지 레이저 조사 효과를 연구하여 참고할만한 연구 결과를 제공하고 있으나 주로 평판 위주의 실험 결과를 공개하고 있다. Yang<sup>7</sup>의 경우 강철 실린더에 대한 연구이나 본 연구에 비해 레이저의 출력이 다양하지 않고, 공기흐름이 고려되지 않아서 실제 조건과는 차이가 있다. 본 연구에서는 비행체의 형상을 모사한 원통형 강철 구조에 대해 최대 10 kW 까지의 레이저 출력과 최대 75 m/s 이하의 공기흐름 조건하에서의 표적의 손상에 대해 온도 및 고속카메라 영상 계측을 통해 정량적으로 분석하였다. 또한 상용 다물리 해석 코드인 COMSOL Multiphysics(Ver. 6.2)<sup>9</sup>를 사용하여 레이저 조사 실험조건에 대한 수치해석을 수행하였으며 표적의 온도 상승을 실험결과와 비교하였다. 특히 다른 문헌에서는 볼 수 없었던 표적과 공기흐름 영역이 조합된 해석모델 작성을 통해 실험 조건과 가깝게 공기흐름이 고려된 해석을 수행하였다. 본 실험의 레이저는 멀티모드로서 이에 따라 해석에서 빔 직경 내에서 빔 에너지가 균일한 분포를 갖도록 Top-hat shape 형태로 모델링 하였으며 또다른 형태의 분포인 Gaussian 분포의 해석결과와도 비교하여 적합함을 입증하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편

본 연구에서는 비행체의 구조를 모사한 반원형 강철 (STKM 17A 구조용 강판) 구조 시험편을 사용하였다.

시험편의 형상은 외경이 133 mm, 길이 200 mm, 두께가 9 mm로 제작되었으며 Fig. 1에서 보는 바와 같다.

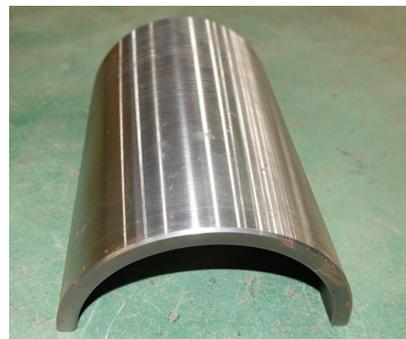


Fig. 1. Test specimen

## 2.2 실험 장치

실험에 사용된 장치를 도식화하여 Fig. 2에 나타내었다. 본 실험은 고출력 레이저 장비의 안정적 운용과 안전을 고려하여 실내에서 수행하였다.

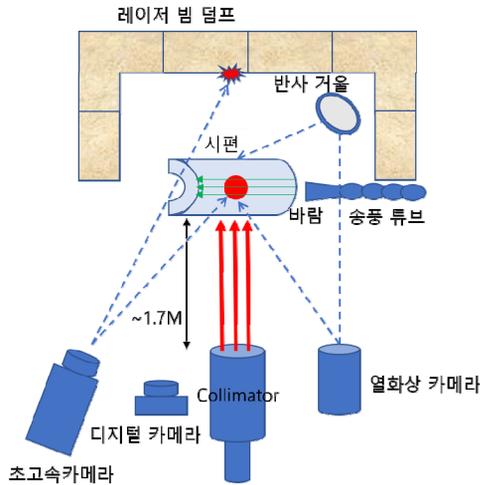


Fig. 2. High-energy laser experimental setup

실험에 사용된 레이저 장비는 IPG社의 YLS-3000-CT 이었으며, 시준기(D50-F200, FCH-16)를 사용하여 레이저 빔의 구경을 24 mm로 설정하였다. 레이저에 의한 시험편의 용융 관통 시점과 온도 변화 및 분포를 확인하기 위해 초고속 카메라(Photron社, FASTCAM SA-5)와 열화상 카메라(FLIR社, A655sc)를 사용하였다. 열화상 카메라의 경우, 시험편 후면부에 Edmund사의 알루미늄 기관, 알루미늄 코팅 4인치 구경 IR 반사거울(#20-154)을 설치하여 시험편의 전면부 및 후면부 온도를 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 비행체의 구조의 공기역학적 환경을 모사하기 위하여 공기압축기를 사용하여 시험편 표면에 공기흐름을 부여하였다. 공기흐름의 속도는 레이저 출력 크기에 따른 레이저 조사 실험에서는 약 33 m/s로 고정하였고, 공기흐름 속도에 따른 레이저 조사 실험에서는 각각 대략 25, 50, 75 m/s로 설정하였다. 공기흐름의 속도는 피토 튜브(Pitot tube)로 측정하여 조절하였다. 실험 여건을 고려하여 시험편과 시준기 간의 거리는 약 1.7 m로 배열하였다. 실험 시험편은 강철 소재의 시험편 거치대에 부착이 용이하도록 자석을 사용하여 시험편의 가장자리를 고정하였으며(단열조건이 아닌) 비행조건을 모사하도록 길이 방향이 중력 방향과 수직이 되게 설치하였다.

## 2.3 실험 결과

### 2.3.1 레이저 출력의 영향

레이저 출력에 따른 영향을 확인하기 위하여 공기흐름의 속도를 대략 33 m/s로 일정하게 설정하였고, 레이저 출력을 2.2, 2.7, 4, 6, 10 kW로 설정하고 시험편의 관통 시점을 기준으로 관통시간, 영상, 열 분포를 측정하였다. Fig. 3에 시험편을 기준으로 초기 모습부터 각 출력 조건에 따른 용융 관통 시점의 시험편의 거동을 나타내었다.

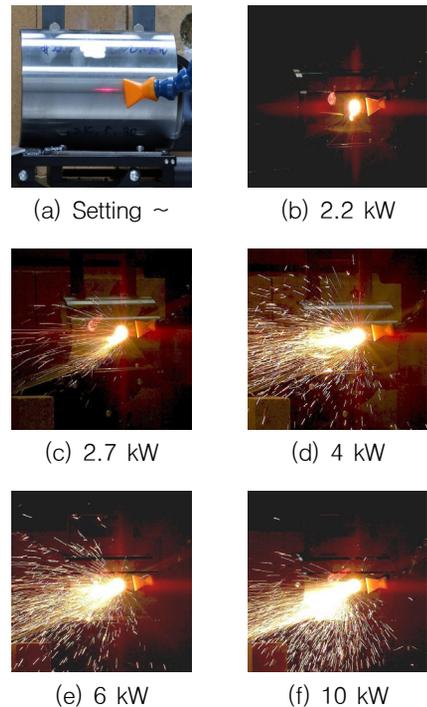


Fig. 3. Experimental results of high-energy laser irradiation in different powers on the half-cylindrical steel structure specimen under airflow with the speed of around 33 m/s

레이저가 조사되는 순간에 공기흐름에 따라 시험편 용융물의 파편이 비산하는 것을 알 수 있다<sup>[1]</sup>. 용융물의 파편은 공기흐름의 방향으로 비산하며, 출력이 증가할수록 용융이 촉진되므로 용융물의 비산 정도가 증가하는 경향을 나타낸다. 출력이 2.2 kW 경우 타 조건과 비교했을 때 긴 시간을 조사하더라도 겨우 관통되었으며, 용융이 활발하지 않으므로 용융물의 비산이 거의 발생하지 않았다. 레이저 출력이 증가함에 따

라 시편의 용융 관통 시간이 단축되었다. 이를 빔 에너지 밀도(빔 출력을 빔 면적으로 나눈 값)와 용융-관통(melt-through) 시간의 그래프로 Fig. 4와 같이 나타내었다. 그래프에서 보듯이 빔 에너지 밀도 증가에 따라 관통 시간이 급격히 감소함을 알 수 있다.

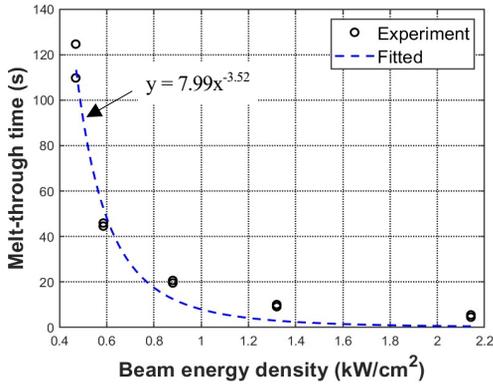
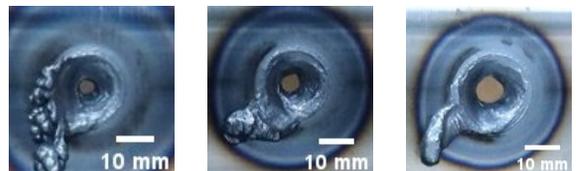


Fig. 4. Comparison of beam intensity and specimen melt-through time under airflow condition

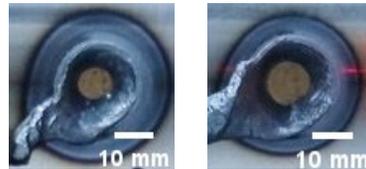
비교를 위해 온도 상승 부분을 선형 피팅하여 시간 축에 대한 기울기를 비교하면 Table 1과 같다. Table 1에서 보듯이 레이저 출력이 증가함에 따라 시험편의 온도 변화 기울기가 크게 증가하므로 짧은 시간에 온도 상승이 급격히 이루어짐을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of slopes(°C/s) at each temperature rising zone

출력(kW)	2.2	2.7	4	6	10
전면부	58.2	126.7	500.9	1377.3	2800.3
후면부	8.1	16.5	38.5	100.6	194.2



(a) 2.2 kW, Φ3.8 (b) 2.7 kW, Φ5.1 (c) 4 kW, Φ7.2



(d) 6 kW, Φ8.6 (e) 10 kW, Φ10.8

Fig. 6. Comparison of through-hole diameters depending on various laser powers

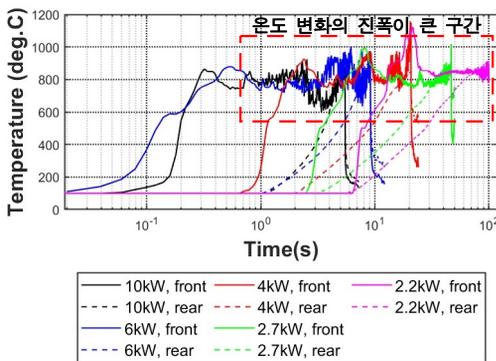


Fig. 5. Comparison of temperature variations at the beam center points of front and rear in the half-cylindrical steel structure depending on different laser powers

Fig. 5에는 각 실험조건에 따른 시험편 전면부와 후면부의 빔 직경 중심점 최대 온도 변화를 그래프로 나타내었다. Fig. 5에서 10 kW와 6 kW 실험의 초반 온도 증가 구분과 측정시간이 상대적으로 긴 2.2 kW 실험의 온도 데이터를 동시에 볼 수 있도록 시간 축(X축)에 log를 취하였다. Fig. 5에서 출력 증가에 따른 온도 상승 기울기의 증가를 알 수 있지만 정량적인

Fig. 5에서 실선으로 표현한 전면부 온도 최대 분포에서 급격한 온도 상승 후에 온도 변화의 진폭이 큰 구간이 관찰된다. 이는 시험편 온도 상승에 따른 용융 풀 형성과 공기흐름에 의한 용융물의 유동 및 제거, 용융물 제거 후 노출되는 새로운 면적에 대한 레이저 조사 결과로 판단된다. 최종적으로 앞의 과정에 의해 구멍이 발생한다. 구멍 생성시 빔 직경 중심점의 재료가 완전히 제거되므로 그림에서 보듯이 온도가 수직에 가깝게 감소하며, 해당 시간을 기준으로 관통 시간을 판단할 수 있다. 전면과 달리 후면의 경우는 재료 두께 때문에 그만큼 열전달이 지연되므로 전면에 비해 완만한 온도 상승을 나타내다가 용융 관통 직전 전면과 열평형이 이루어지므로 전면의 온도 곡선과 만나고, 용융 관통시는 전면과 마찬가지로 온도의 수직

강하가 발생한다. Fig. 5에서 보듯이 용융 관통 시점에서 전면과 후면의 온도 강하가 동시에 발생한다. 레이저 출력 크기에 따른 시편 손상도를 평가하기 위해 Fig. 6과 같이 실험 후 시편의 관통 구멍의 크기를 비교하였으며 이를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다. 두 그림에서 보듯이 레이저 출력 크기가 증가하면 용융후 제거된 부위가 커지므로 관통구멍 크기도 증가하여 시편의 손상 정도가 더 심해짐을 알 수 있다.

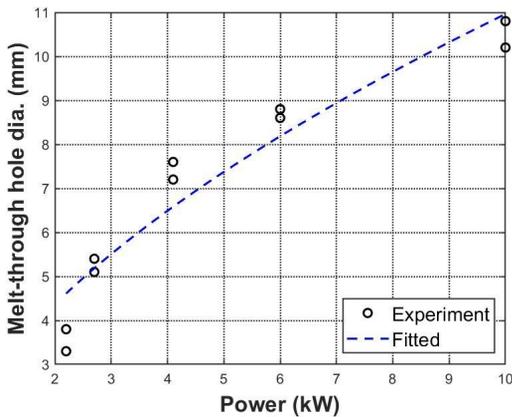


Fig. 7. Relation between beam powers and through-hole diameters

### 2.3.2 공기흐름의 영향

공기흐름에 의한 온도 변화 영향을 검토하기 위해 레이저 출력이 같은 조건에서 공기흐름 속도를 변화시켜 가면서 레이저 조사실험을 수행하였다. 이를 위해 레이저 출력을 5 kW로 고정하고 공기흐름 속도가 각각 0, 25, 50, 75 m/s 조건으로 실험하였다. 5 kW로 출력이 같은 조건에서 공기흐름 속도를 달리하였을 때 레이저 조사후 같은 경과 시간(10초)에서의 시편의 상호작용 반응을 비교하면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 보듯이 공통적으로 용융물의 비산이 발생하고 있으며, 공기흐름이 없는 경우에 비해 공기흐름 속도가 증가할수록 용융물 파편의 양이 많아지며 공기흐름 방향으로 파편이 넓게 퍼지면서 비산한다. 이들 실험에서 측정된 반원형 강철 구조의 전면과 후면의 레이저 빔 직경 중심점의 최대 온도 변화를 비교하면 Fig. 9와 같다. 레이저 조사 후 용융 풀이 생성되기 전까지는 온도 상승 곡선이 거의 일치하는 것으로 나타나서 용융 풀이 생기기 전까지는 공기흐름의 영향이 거의 없는 것을 알 수 있다. 두 번째로 용융 풀 생성 이후부

터 용융 관통이 발생하기까지의 온도 변동 폭이 큰 구간에서 공기흐름 속도 증가에 따라 온도가 감소하였으며 이는 공기흐름 속도가 증가함에 따라 반원형 강철 구조에서 온도가 높은 용융물이 공기흐름에 의해 더 빨리 제거됨에 따라 발생한 것으로 이해된다. 또한 이 때문에 공기흐름 속도 증가에 따라 용융물이 더 빨리 제거되므로 새로운 부위에 레이저 조사가 이루어져 용융 관통이 더 빨리 생기게 된다.

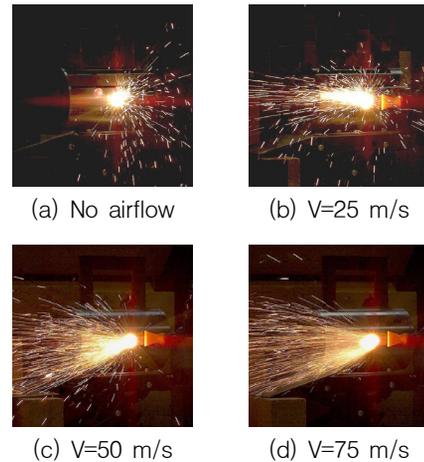


Fig. 8. Comparison of ablation behaviors at 10 s after laser irradiation for the specimens depending on the increment of airflow velocity at the same laser power in 5 kW

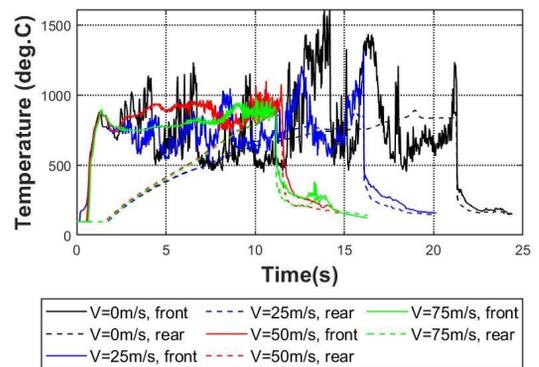


Fig. 9. Comparison of temperature variations at the beam center points of front and rear in the half-cylindrical steel structures depending on variations of wind speed under 5 kW laser irradiation

이에 따라 그림에서 보듯이 용융 관통 시간이 단축된다. 그러나 그림에서 보듯이 공기흐름이 없는 조건에 비해 공기흐름 속도가 각각 25 m/s와 50 m/s에서는 용융관통 시간의 단축이 확인하지만 75 m/s의 경우는 50 m/s에 비해 그 차이가 뚜렷하지 않다. 본 실험에서 사용한 공기압축기 용량 한계로 75 m/s 이상의 속도는 얻기 힘들었으며 따라서 50 m/s 이상에서 용융 관통 시간의 수렴성 여부에 대해서는 본 연구에서 어떠한 결론 도출이 제한적이다.

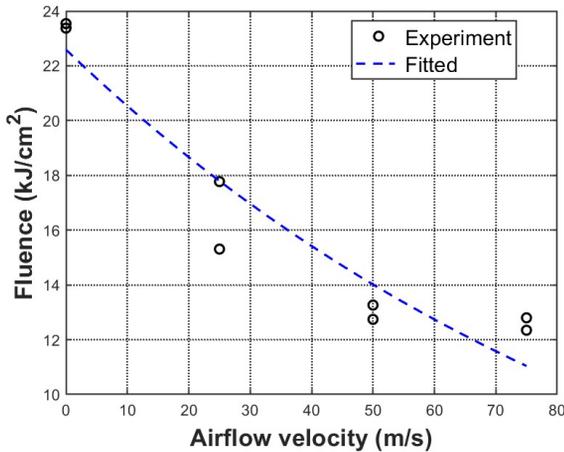


Fig. 10. Comparison of the fluence depending on different wind speeds under the identical laser irradiation of 5 kW

한편 반원형 강철 구조 후면에서의 온도 상승은 전면과는 달리 용융풀이 없으므로 온도 변화의 진동없이 단조적으로 증가하다가 용융 관통 및 용융부 제거 시점에서 큰 폭으로 감소하는 경향을 나타낸다. 단, 공기흐름 속도의 증가에 따라 용융 관통이 빨라지므로 전면과의 열평형도 빨라져서 온도 상승 기울기가 증가한다. 용융 관통 에너지(Fluence)는 빔 에너지 밀도에 관통 시간을 곱한 것으로서 빔 에너지 밀도에 따라 재료 관통에 필요한 에너지를 나타낸다. 5 kW 출력 조건에서 반원형 강철 구조의 공기흐름 속도에 따른 용융 관통 에너지(Fluence) 변화를 나타내면 Fig. 10과 같으며, 공기흐름이 없는 경우에 비해 송풍 조건에서 공기흐름 속도 증가에 따라 용융 관통 에너지가 감소함을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 공기흐름 속도가 증가하면서 용융물이 공기흐름에 의해 더 빨리 제거되어 시편의 삭마(ablation)가 촉진되기 때

문이다. 5 kW 출력 조건에서 공기흐름 속도 변화에 따른 시편의 손상 정도를 비교하면 Fig. 11과 같다. 그림에서 보듯이 관통 구멍에서 발생한 용융물의 방향이 공기흐름이 없는 경우 중력 방향인 반면 공기흐름 속도 증가에 따라 공기흐름 방향과 중력 방향의 벡터 합 방향인 것을 볼 수 있다. 또한 관통 구멍 직경 크기를 비교하면 공기흐름이 없는 경우에 비해 공기흐름 속도가 증가하는 경우에 구멍 직경이 더 감소하였는데 이는 같은 출력에서 공기흐름속도가 증가하면 관통 시간이 단축되어 그만큼 열에너지가 적게 받기 때문에 생긴 결과로 이해된다.

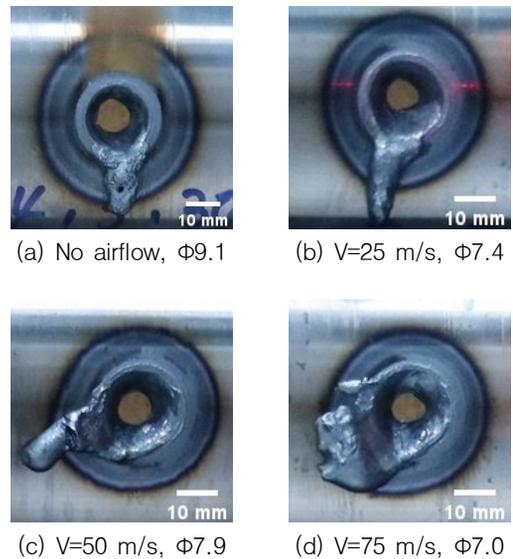


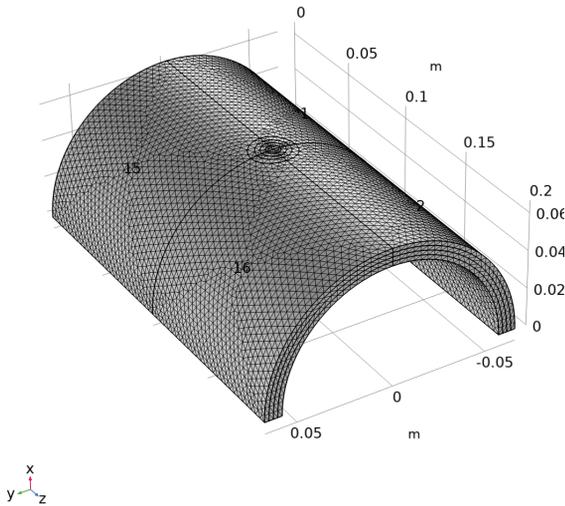
Fig. 11. Comparison of through-hole diameters depending on increments of airflow speed under the identical 5 kW laser irradiation

### 3. 수치해석

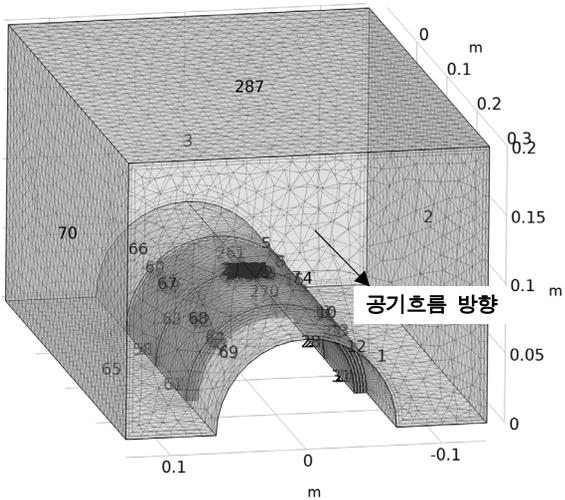
#### 3.1 해석모델

본 연구에서는 레이저 조사실험에서 사용된 반원형 강철 구조 시편에 대한 수치해석을 위해 상용 해석코드인 COMSOL Multiphysics(Ver. 6.2)<sup>9)</sup>를 사용하였다. 앞의 실험조건에 대한 해석을 위해 공기흐름 환경에서의 금속재에 대한 열전달 해석이 필요하며 COMSOL에서 이를 지원하고 있다. 본 해석에서는 COMSOL의 Application Libraries(Heat Transfer Module/Tutorials, Forced

and Natural Convection/Chip-Cooling)를 참고하여 유체의 비등은 거동 가정하에 유체(공기)의 속도와 고체의 열전달을 결합하여 해석을 수행하였다. 이를 위해 Fig. 12와 같이 유한요소해석 모델을 작성하였다.



(a) A model without airflow



(b) A model considering airflow

Fig. 12. COMSOL numerical simulation models for laser irradiation against the semi-cylindrical steel structure under airflow

Fig. 12(a)는 공기흐름이 없는 경우의 반원형 강철 구조 모델로서 윗면 중심에 레이저 조사를 모사한 열

에너지 입력을 위해 본 실험에서 조사된 레이저 빔 직경과 같은 크기인 24 mm 직경의 원(가장 바깥 원)을 생성하여 두께 방향으로 관통시켰고, 데이터 추출점 생성을 위해 중심에 대해 동심원을 몇 개 추가하였다. 또한 두께 방향으로의 격자(mesh) 밀도를 증가시키기 위해 구조를 두께 방향으로 4개의 층으로 나누었다. 레이저 조사실험에서는 공기흐름 환경을 모사하기 위해 시편 표면에 공기를 불어주었으며 이를 수치해석에서 고려하기 위해 Fig. 12(b)와 같이 강철 구조 위에 공기흐름 영역을 추가하였다. 이때 강철 구조의 표면 위로만 공기흐름을 주도록 공기 영역의 하부는 강철 구조의 외경과 동일한 크기의 터널을 만들어 주었으며 공기흐름은 후면에서 전면방향으로 향한다. 공기흐름 영역 추가시 효율적인 해석을 위해 공기흐름 영역 크기 설정에 대한 제한이 필요하다. 레이저 조사 해석 관련 문헌에서 공기흐름 적용사례를 찾기 힘들므로 공기 영역 크기 결정을 위해 본 해석에서는 시편 구조의 외경과 길이에 대한 일정한 비율(체적의 폭과 높이는 외경의 배수, 길이는 시편 길이의 배수)을 적용하여 Table 2와 같이 두 종류의 공기 영역 체적에 대해 비교하였다. 10 kW 출력, 60 % 흡수율, 33 m/s 공기흐름 속도, 해석시간 10 초 조건으로 해석하였을 때의 두 공기 영역 경우에 대한 해석결과(5.5 초에서의)를 비교하면 Table 2와 같다.

Table 2. Comparison of COMSOL analysis results for two different kind of air region volumes

경우	공기 영역 (폭×높이×길이, mm <sup>3</sup> mm <sup>3</sup> )	최대 온도 (°C)	공기 속도 (m/s)	비고
A	266×200×400 (2배×1.5배×2배)	2410	32.5~34.6	
B	399×266×600 (3배×2배×3배)	2400	32.6~34.8	체적이 A의 3배임

Table 2에서 보듯이 공기 영역 크기에 따른 해석 결과는 거의 차이가 없는 것으로 나타나서 해석자원의 효율적 활용 측면에서 B 경우에 비해 체적이 1/3인 A 경우가 유리한 것으로 나타났으며, 이에 따라 본 해석에서 공기 영역의 크기를 A 경우로 정하였다. 본 해석에서 사용한 강철과 공기에 대한 재료 상수는 Table 3에서 보는 바와 같다.

Table 3. Material properties for the structural steel and air used in laser irradiation simulation<sup>[9]</sup>

항목	단위	Steel	Air
Heat capacity	J/(kg·K)	475	1005.7 (at 300K)
Thermal conductivity	W/(m·K)	44.5	0.0263 (at 300K)
Density	kg/m <sup>3</sup>	7850	1.2175 (at 290K)
Coefficient of thermal expansion	1/K	12.3×10 <sup>-6</sup>	0.0033 (at 300K)

3.2 빔 에너지 분포 모델링

멀티모드 레이저 조사의 경우는 균일한 빔 에너지 분포가, 단일모드 레이저 조사에 대해선 Gaussian 에너지 분포가 좋은 근사를 나타내므로<sup>[10]</sup> 멀티모드 레이저를 사용한 본 실험에 대해서 해석에서 균일한 에너지 분포를 위해 Top-hat shape(빔 직경에 걸쳐 균일한 에너지 분포) 형태로 레이저 빔의 에너지 분포 모델링을 하였다. 한편 비교를 위해 Gaussian(빔 직경 중심점을 중심으로 종 모양 에너지 분포) 빔 분포에 대해서도 검토하였다.

Top-hat shape 형태의 빔 분포 결과 전체 해석 시간인 10 s에서 해석 초기인 0.5 s에서의 온도 분포는 Fig. 13(a)와 같이 비교적 중심부가 평평한 온도 분포를 나타낸다. 반면 Gaussian 분포의 경우 빔 직경 중심점을 중심으로 종 모양 형태의 분포를 가지며 그 결과로서 Fig. 13(b)에서 보듯이 해석 초기인 0.5 s 시점에서의 빔 직경 부위의 시편 온도 분포가 빔 중심의 좁은 영역에 온도 상승이 집중됨을 나타낸다.

3.3 수치해석 결과 및 검토

본 연구에서는 레이저 출력이 10 kW이고 공기흐름 속도가 약 33 m/s 조건에서 반원형 강철 구조의 표면 중앙부위에 레이저가 조사되는 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. 동일한 조건의 실험에서 레이저에 의해 강철 구조에 용융에 의한 관통이 발생하는 시간이 레이저 조사 후 약 5.5 s 시점이었으며 이때의 해석 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

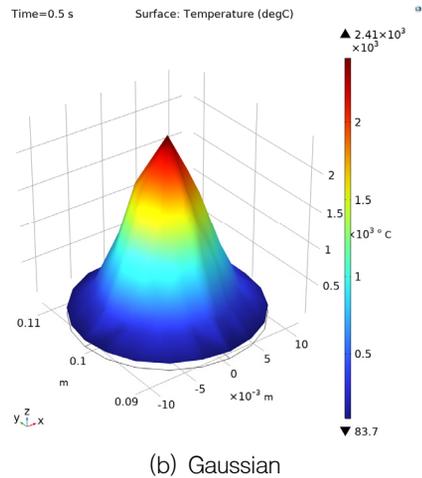
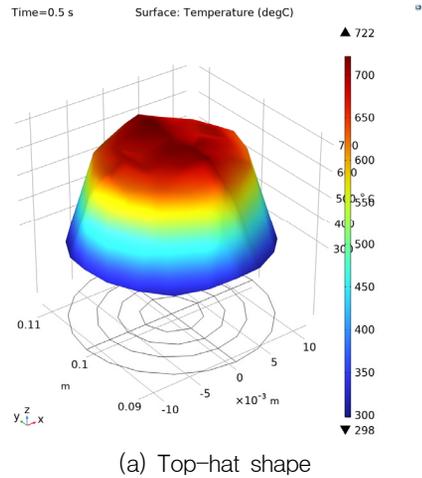


Fig. 13. Comparison of temperatures of beam area at 0.5 s for two different laser beam distributions in COMSOL simulation

Fig. 14(a)는 공기 흐름을 포함한 전체 모델로서 오른쪽에 온도와 공기흐름 속도 범위 범례를 표시하였다. 최대온도는 약 2410 °C이고 공기흐름 속도는 초기 속도와 유사한 대략 33~34 m/s임을 알 수 있다. Fig. 13(a)에서 공기흐름 화살표 때문에 강철 구조의 온도 변화가 잘 보이지 않으므로 공기영역을 제거하고 반원형 강철 구조만 나타내면 Fig. 14(b)와 같다. 레이저에 대한 흡수율은 레이저-재료 상호작용의 수치해석에서 주요한 불확실성들 중의 하나이다<sup>[11]</sup>. Osterholz 등<sup>[12]</sup>은 강철에 대한 1.07 μm 파장의 CW 레이저 조사 실험에서 빔 에너지 밀도 약 2~3 kW/cm<sup>2</sup>에서 평균

흡수율 측정결과가 약 0.6임을 발표한 바 있다. 한편 Indhu<sup>[13]</sup>의 그래프에서 1.07  $\mu\text{m}$  파장에서 Nd:YAG 레이저에 대한 강철의 흡수율은 약 40 %로 나타난다. 본 실험에서 빔 직경이 24 mm 이므로 출력 10 kW에 대해 빔 에너지 밀도는 약 2.2  $\text{kW}/\text{cm}^2$ 이다. 따라서 본 연구는 Osterholz의 경우와 더 유사하나 비교를 위해 Osterholz와 Indhu의 흡수율을 각각 적용하여 보았다. 수치해석에서는 레이저 출력 $\times$ 흡수율(즉 10 kW  $\times$  0.6 또는 10 kW  $\times$  0.4)의 에너지를 시편 표면의 빔 직경 면적에 가하였으며, 시편 전면(레이저 조사면)과 후면(안쪽면)의 빔 직경 중심점의 온도 분포를 Fig. 15에서 각각 실험결과와 비교하였다.

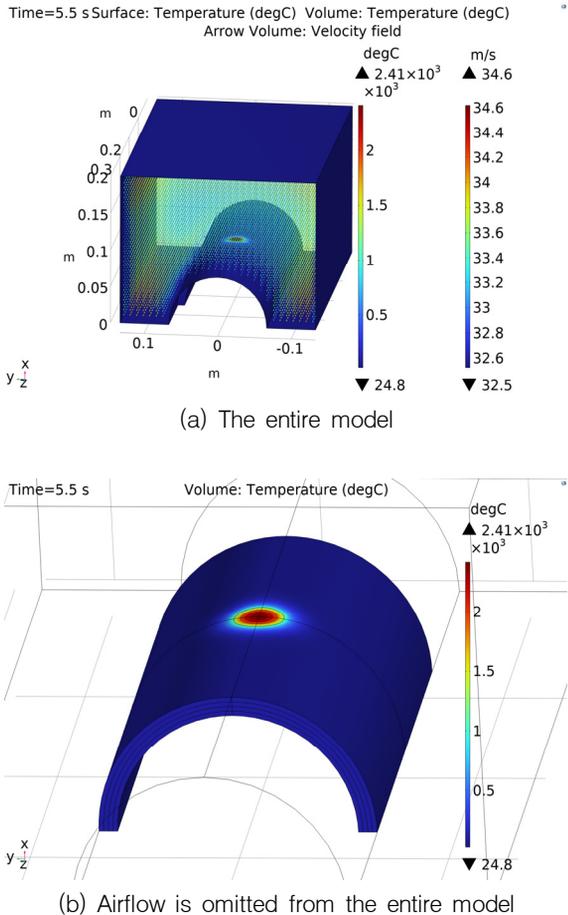


Fig. 14. COMSOL simulation results for the half-cylindrical structure irradiated by 10 kW laser power at 60 % absorption and flow velocity of 33 m/s

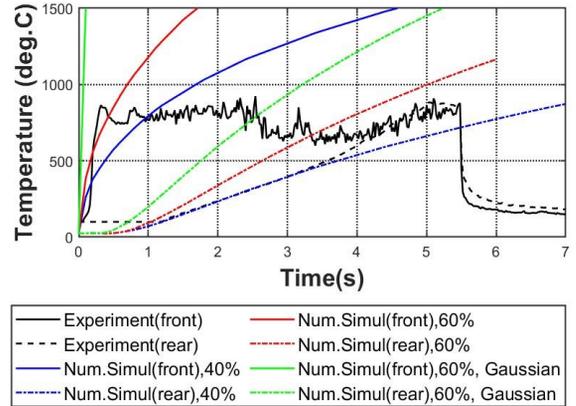


Fig. 15. Comparison of results between COMSOL simulation and experiment of laser irradiation against the half-cylindrical structure with the conditions of 10 kW power and 33 m/s airflow speed

본 COMSOL 해석에서 레이저에 의한 가열에 따른 시편 용융과 관통 거동 모사(즉 고체에서 액체로의 상변화 거동과 용융에 의한 재료의 제거)는 제한되므로 시편 전면의 경우 용융 풀이 형성되기 전까지의 온도 구간 그리고 후면의 경우는 용융 관통이 발생하기 전까지만 온도 변화 비교가 가능하다. 또한 본 해석에서 유체(공기 흐름)의 속도와 고체의 열전달 조합 해석만 가능하므로 공기흐름에 의한 용융물 제거는 포함되지 않는다. Fig. 15에서 보듯이 40 % 흡수율에 비해 60 % 흡수율 적용 결과가 전면에서 실험결과에 좀 더 근사한 온도 상승을 보였다. 반면 후면의 경우 60 %와 40 % 흡수율 모두 실험 결과와 차이를 나타냈다. 빔 에너지 분포의 경우 그림에서 보듯이 흡수율 60 %의 Gaussian 빔 분포의 경우 전면과 후면 중심점의 온도 상승이 실험결과에 비해 훨씬 크게 나타나서 앞서 언급한 바와 같이 본 실험의 경우에는 top-hat shape 분포가 적합함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 비행체를 모사한 반원형 강철 구조 시편에 대해 공기흐름 조건에서 고에너지 레이저를 조사하였을 때의 시편의 손상에 대해 실험과 수치해석을 통해 분석하였다. 시편에 대한 레이저 조사실험

에서 공기흐름에 의해 용융물의 비산이 발생하였고 레이저 출력이 증가할수록 큰 에너지에 의해 용융이 촉진되므로 용융물의 비산도 활발하였으며 이로 인해 레이저 빔 에너지 밀도 증가에 따라 관통 시간이 감소하였다. 온도 분포의 경우 레이저 출력 크기가 증가함에 따라 전면에서 용융 풀에 도달하는 온도 기울기가 급격히 증가하였다. 후면의 경우는 두께 때문에 열 전달이 지연되므로 전면보다는 완만한 온도 상승을 보였다. 시편의 관통구멍 비교 결과 출력이 증가할수록 용융 부위가 커져서 관통 구멍 크기가 증가하였다. 출력 5 kW 고정 조건에서 공기흐름에 의한 영향 검토 결과 공기흐름이 없는 경우에 비해 공기흐름 속도가 증가함에 따라 용융물의 비산이 활발해졌으며 이로 인해 관통시간이 크게 단축되었다. 따라서 공기흐름속도 증가에 따라 Fluence(용융-관통에 필요한 에너지)가 감소하는 경향을 나타낸다. 본 연구에서는 실험 조건에 대한 수치해석을 위해 상용코드를 사용하였으나 이전 연구에서는 볼 수 없었던 공기흐름이 고려된 해석모델을 제시하였다. 다중모드 레이저를 사용한 본 실험에 대해 빔 에너지 분포는 Top-hat shape 분포가 적합함을 확인하였으며 60 %의 빔 에너지 흡수율을 적용하였을 때 전면의 빔 직경 중심점의 온도 상승이 실험결과에 비교적 근사하였다.

## 후 기

이 논문은 2024년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임.

## References

- [1] S. Schäffer, D. Allofs, P. Gruhn, A. Gülhan, and M. Lueck, "Experimental investigation of high-power laser irradiation of missile materials in subsonic and supersonic flows," Proc. SPIE Vol. 12273, 2022.
- [2] R. Schleijsen, S. Binsbergen, and M. Geljon, "30kW laser experiments against drones," Proc. SPIE 11539, Technologies for Optical Countermeasures XVII; and HighPower Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects IV, 115390A 2020.
- [3] M. Taillandier, R. Peiffer, B. Colomer, R. Ortiz, and E. Chalumeau, "High-energy laser experiments for vulnerability studies in the context of the European TALOS program," Proc. SPIE Vol. 12273, 2022.
- [4] "Hanwha starts producing 'Block-I' laser weapon," [http://173.100.150.47:11000/jddscontent/janesxml/data/news/jdw/jdw2024/bsp\\_77296.xml](http://173.100.150.47:11000/jddscontent/janesxml/data/news/jdw/jdw2024/bsp_77296.xml), Jane's Defence Weekly 2024.
- [5] W. Baek, K. Lee, S. An, W. Shin, and J. Yoh, "Melt-through characteristics in continuous beam irradiation of flying metal samples in flow speeds up to 85 m/s," Optics & Laser Technology, Vol. 45, pp. 250-255, 2013.
- [6] C. WEI, Y. Zhu, M. Zhou, Z. Ma, and T. Wu, "Melt removal mechanism by transverse gas flow during laser irradiation," Proc. SPIE 10173, Fourth International Symposium on Laser Interaction with Matter, 1017303, 2017.
- [7] L. Yang, W. Tang, L. Liu, J. Shao, and M. Shao, "Study on heat effect of high-power continuous wave laser on steel cylinder," Applied Science, Vol. 10, pp. 7844-1~7844-11, 2020.
- [8] M. Björck, D. Svedbrand, L. Sjöqvist, and S. Edström, "Laser damage experiments on fiber-reinforced plastic," Proc. SPIE 12273, 2022.
- [9] COMSOL Multiphysics, <https://www.comsol.com>
- [10] A. M. Prokhorov, V. I. Konov, I. Ursu, and I. N. Mihailescu, "Laser Heating of Metals," IOP Publishing Ltd., pp. 40-41, 1990.
- [11] S. A. Khairallah, A. Anderson, A. M. Rubenchik, J. Florando, S. Wu, and H. Lowdermilk, "Simulation of the main physical processes in remote laser penetration with large laser spot size," AIP Advances 5, 047120 2015.
- [12] J. Osterholz, D. Heunoske, and J. Horak, "Experimental characterization of energy transfer from large-diameter kilowatt continuous-wave laser beams to metal samples," Journal of Laser Applications, Vol. 29, No. 1, pp. 012011-1~012011-9, 2017.
- [13] R. Indhu, V. Vivek, L. Sarathkumar, A. Bharatish, and S. Soundarapandian, "Overview of laser absorptivity measurement techniques for material processing," Lasers in Manufacturing and Materials Processing, Vol. 5, pp. 458-481, 2018.